

地層が傾斜した沿岸地盤の側方流動に関する液状化解析

岡二三生*・肥後陽介*

* 京都大学大学院 工学研究科

要 旨

地震時の液状化による側方流動は、傾斜した地盤に液状化層を有する場合と護岸の背面に液状化層を有する場合にわけられる。神戸の沿岸部においては山から海にかけて地層が傾斜しており、その地盤上に護岸構造物が存在する箇所が見られる。そこで本研究では、地盤情報データベースを用いて神戸の地盤をモデル化し、砂の繰返し弾塑性構成式を用いた動的有限要素解析法による護岸構造物を対象とした兵庫県南部地震時の液状化解析を行った結果を示す。また、解析結果と地震後の側方流動実測データを比較し、解析モデルの検証を行うと共に、側方流動の挙動について検討している。

キーワード：液状化、側方流動、地盤の傾斜、護岸構造物

1. はじめに

兵庫県南部地震時には、液状化が発生し人工島や沿岸部の護岸構造物において、側方流動による被害が甚大であった。Fig. 1に神戸の代表的な地質断面図を示す。神戸沿岸部の地盤は、砂州や扇状地に相当し、沖積の堆積層は主に砂礫から構成されており、地層は陸から海にかけて緩やかに傾斜している（例えば、神戸の地盤研究会，2002；関西地盤情報活用協議会，1998）。また、神戸には人工島や埋立地が多く存在し、護岸構造物は多数存在する。内陸の沿岸部や埋立地では必然的に地下水位は高いため、神戸の地盤は液状化しやすい地盤と考えられる。

一方、地震時の液状化による側方流動は、傾斜した地盤に液状化層を有する場合と護岸の背面に液状化層を有する場合にわけられる。神戸の沿岸部においては山から海にかけて傾斜した地盤上に護岸構造物が存在する箇所が見られる。このことから、液状化が発生した場合に、護岸構造物が側方流動を起こしやすい条件であると考えられる。

そこで本研究では、地層が傾斜した地盤上に護岸構造物が存在するモデルを設定し、兵庫県南部地震の地震波を入力波とした液状化解析を行う事により、地盤の液状化挙動と護岸構造物の側方流動について検討を行った。地盤のモデル化には、地盤情報デー

タベース「神戸JIBANKUN」（神戸の地盤研究会，1999）を用いた。また、液状化解析には砂の繰返し弾塑性構成式による液状化解析法（液状化解析手法 LIQCA開発グループ，2004）を用いた。解析で得られた護岸構造物の側方流動量と兵庫県南部地震後に計測された側方流動量を比較し解析モデルの検証を行うと共に、側方流動の挙動について検討した。

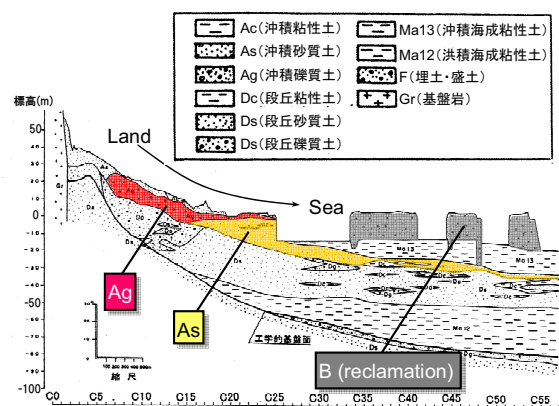


Fig. 1 Representative geologic profile of the central Kobe (Research committee for ground of Kobe, 1998)

2. 液状化解析法

Oka et al. (1999) は非線形移動硬化則に基づく繰返し弾塑性構成式を開発した。本研究の解析法は、

この構成式を用いた、水-土連成動的有限要素解析法LIQCA2D04（液状化解析手法LIQCA開発グループ、2004）である。

3. 解析対象断面のモデル化

Fig. 2 に今回モデル化した地盤の縦断面図を示す。これは、地盤情報データベース「神戸JIBANKUN」のボーリングデータから推定した神戸沿岸域の地盤であり、砂・シルト・粘性土の互層が陸側から海側へかけて傾斜している様子が伺える。この断面には運河の内護岸と防潮堤をモデル化しており、内護岸は傾斜した砂層の上に存在している。Fig. 1 に示す内の1本のボーリングデータについて、液状化判定計算を行った結果（兵庫県南部地震観測波を用いた）、沖積砂層が液状化対象層となったが、礫層の液状化抵抗が大きくPL値は5.6であった。

4. 解析条件と入力地震波

解析に用いたメッシュ図と境界条件をFig. 3 に示す。下端は洪積の砂礫層（Dg2層、GL-50m）までをモデル化し、地震波を入力した。入力波は、兵庫県南部地震を想定し、KBPR（古本ら、1999）およびFDEL（杉戸ら、1994）を用いて計算された地震波である（Fig. 4）。

また、Table 1 に解析に用いた液状化対象層のパラメータを示す。本研究では、パラメータを決定するのに必要な調査・試験を行っていないため、N値や粒度

分布などのデータと既往の液状化解析から数値を推定し、解析で得られた護岸の水平移動量が地震後に計測された実際の移動量と良い整合を得るようなパラメータを試行錯誤により決定した。このパラメータを用いて砂の繰返し弾塑性構成式で非排水繰返し三軸試験をシミュレーションした。埋土層とAs1層の応力-ひずみ関係、有効応力径路をFig. 5に、埋土層とAs1層の液状化強度曲線をFig. 6に示す。Fig. 6には神戸域における既往の実験結果を合わせて示しているが、解析で想定した地盤は、神戸域における砂質土の実験結果に性状が類似していると言える。

なお、液状化対象層以外の砂層および砂礫層は、液状化の発生を考慮しないことから、ダイレイタンスー係数 $D_0 = 0$ とし、基準ひずみによる剛性低下は無いものとした。また、粘性土層はR-Oモデル、護岸・防潮堤は弾性体を仮定した。1ステップ当たりの時間増分 $\Delta t = 0.001$ (sec) とし、総ステップ数は30000 (step) である。

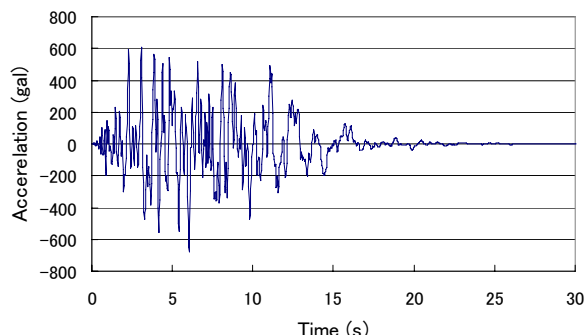


Fig. 4 Seismic input motion (Calculated wave of the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, NS component)

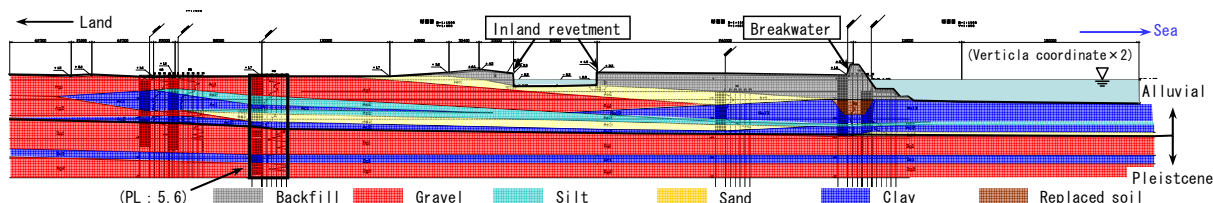


Fig. 2 Ground profile deduced by the ground information database

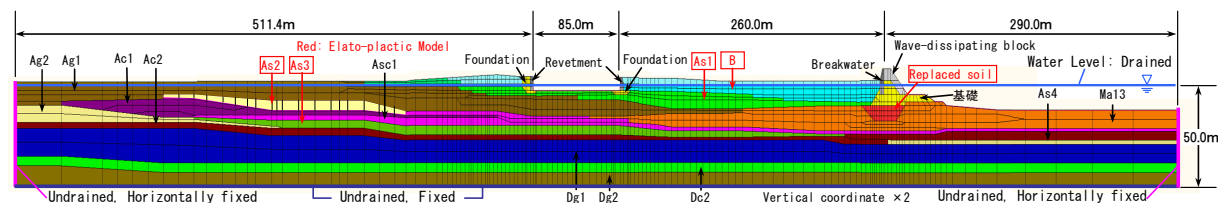


Fig. 3 Finite element meshes and boundary conditions

Table 1(a) Material parameters for cyclic elasto-plastic model

Material	B	Ba	As1	As2	As3
Density ρ (g/cm ³)	1.80	1.80	1.70	1.90	1.90
Coefficient of permeability k (m/s)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
Initial void ratio e_0	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
Compression index λ	0.0025	0.0025	0.01	0.0046	0.0046
Swelling index κ	0.0015	0.0015	0.003	0.0023	0.0023
Quasi-overconsolidation ratio OCR*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Initial shear modulus ratio G_0/σ'_m	1013	1013	512	691	676
Phase transformation stress ratio M_m^*	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909
Failure stress ratio M_f^*	1.158	1.158	1.158	1.158	1.158
Hardening function parameter B_0^*	3800	4000	3800	4000	4200
Hardening function parameter B_1^*	70	75	70	80	80
Hardening function parameter C_f	0	0	0	—	—
Referential strain parameter γ_r^{P*}	0.005	0.008	0.005	0.008	0.008
Referential strain parameter γ_r^{E*}	0.01	0.016	0.01	0.016	0.016
Dilatancy coefficient parameter D_0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Dilatancy coefficient parameter n	4	5	6	7	9

Table 1(b) Material parameters of cyclic elasto-plastic model for non-liquefiable ground

Material	As4	Ag1	Ag2	Dg1	Dc1	Dg2	W.-D. block
Density ρ (g/cm ³)	1.90	1.70	1.90	2.00	1.60	2.00	1.16
Coefficient of permeability k (m/s)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-7}
Initial void ratio e_0	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.400
Compression index λ	0.0046	0.01	0.01	0.01	0.025	0.025	0.01
Swelling index κ	0.0023	0.003	0.0025	0.003	0.01	0.0035	0.005
Quasi-overconsolidation ratio OCR*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Initial shear modulus ratio G_0/σ'_m	676	512	676	541	144	450	311
Phase transformation stress ratio M_m^*	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909
Failure stress ratio M_f^*	1.158	1.158	1.158	1.336	0.980	1.336	1.336
Hardening function parameter B_0^*	3000	3000	3000	3000	3000	3000	1000
Hardening function parameter B_1^*	—	—	—	—	—	—	—
Hardening function parameter C_f	—	—	—	—	—	—	—
Referential strain parameter γ_r^{P*}	—	—	—	—	—	—	—
Referential strain parameter γ_r^{E*}	—	—	—	—	—	—	—
Dilatancy coefficient parameter D_0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dilatancy coefficient parameter n	—	—	—	—	—	—	—

Table 1(c) Material parameters for R-O model and elastic model

Material	Ma13	Ac1	Ac2	Asc1	Foundation	Revetment
Density ρ (g/cm ³)	1.40	1.40	1.60	1.70	2.00	2.30
Coefficient of permeability k (m/s)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-7}
Initial void ratio	—	—	—	—	0.400	0.800
Lame's constant $\tilde{\lambda}$ (kPa)	—	—	—	—	2.70E+05	4.30E+06
Lame's constant $\tilde{\mu}$ (kPa)	—	—	—	—	1.80E+05	8.57E+06
Poisson's ratio ν	0.35	0.35	0.35	0.35	0.300	0.167
Cohesion c (kPa)	50	50	50	50	—	—
Internal friction angle ϕ (deg)	0	0	0	0	—	—
Parameters of shear modulus a	38250	38250	38250	38250	—	—
Parameters of shear modulus b	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—
Parameters of R-O nonlinearity α	6.17	6.17	6.17	6.17	—	—
Parameters of R-O nonlinearity r	2.13	2.13	2.13	2.13	—	—

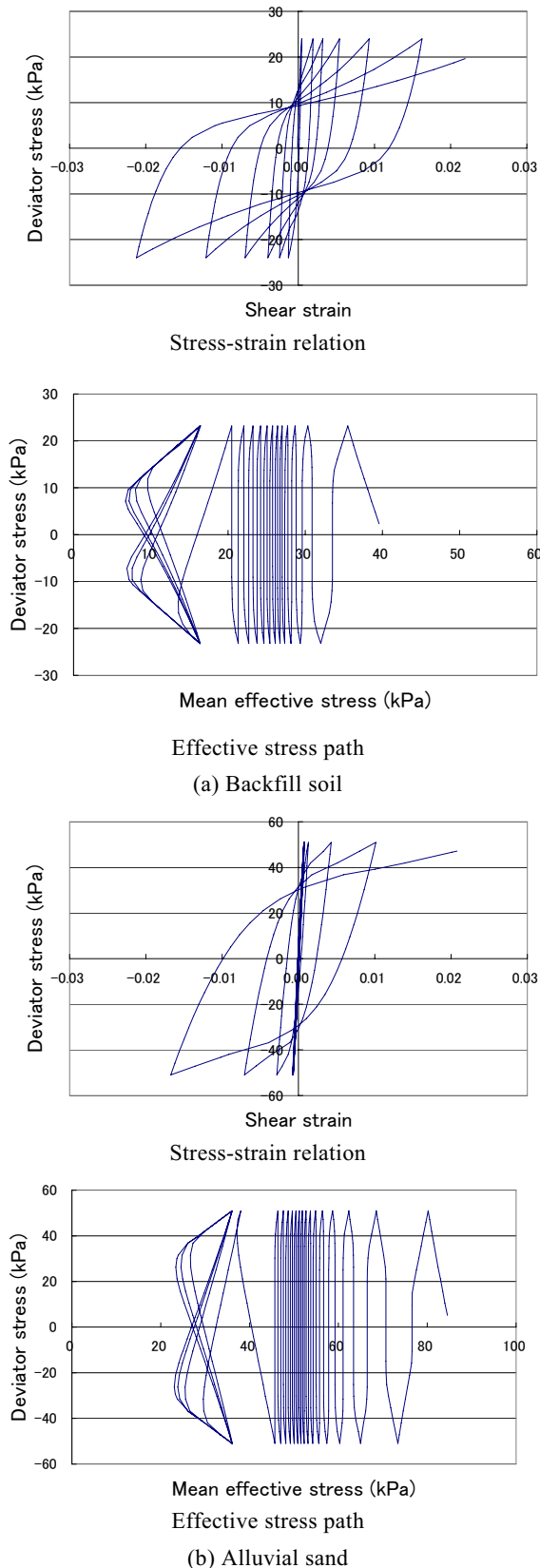


Fig. 5 Stress-strain relations and effective stress path obtained by numerical simulation of undrained cyclic triaxial test, (a) Backfill soil (b) Alluvial sand

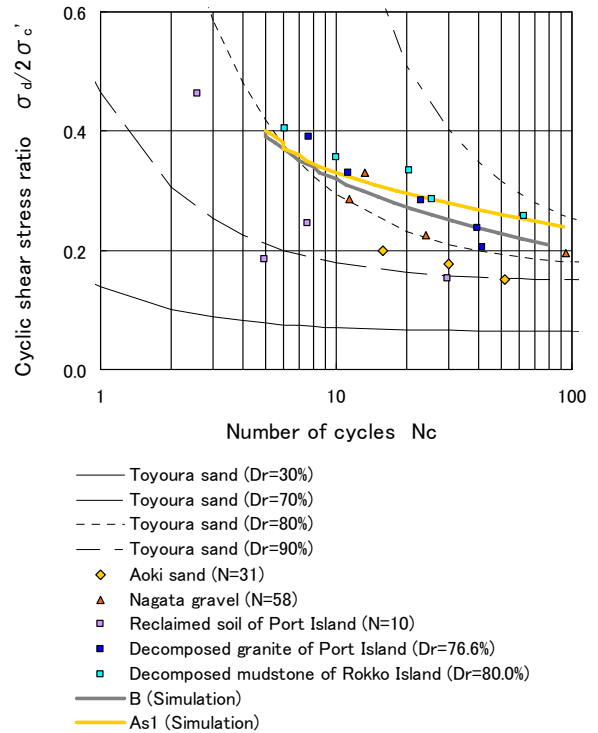


Fig. 6 Experimental liquefaction strength curves for soils of Kobe and numerical simulation of liquefaction strength curves for backfill soil, B layer, and Alluvial sand, As1, layer (Higashi and Tamura, 1997; Geo-Database Information committee of Kansai, 1998; Tanaka, 1998)

5. 解析結果

解析の結果として、内護岸の変形図をFig. 7に示す。内護岸Aの変形図を見ると、地盤は傾斜に従って海側へ水平移動し、護岸も運河の方向にはらみだすように変位している。一方、内護岸Bの護岸部は運河の方向へ水平移動しているが、運河から離れた位置では地盤の傾斜に伴って海側へ水平移動している様子が伺える。Fig. 8の内護岸Bよりも海側に存在する防潮堤の変形図を見ると、海側へ水平移動しており背面地盤の海側への移動と沈下が見られる。

液状化の発生状況を見るため、相対有効応力減少比の分布図をFig. 9に示した。相対有効応力減少比は、 $1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$ (σ'_m : 現在の平均有効応力, σ'_{m0} : 初期平均有効応力) で定義され、初期状態は0で1になると液状化した事を示す。図を見ると主要動が始まって間もなくの5秒後に埋土層と沖積砂層で有効応力が減少し始めており、主要動の終盤となる10秒後～15秒後には、液状化が発生している様子が伺える。

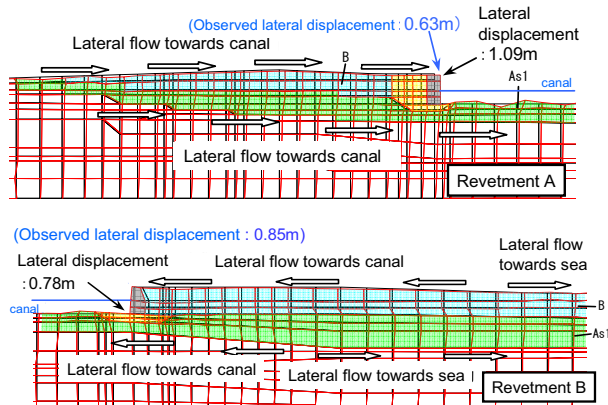


Fig. 7 Deformed mesh of inland revetments (Black: Initial state $t = 0$ (s), Red: $t = 30$ (s))

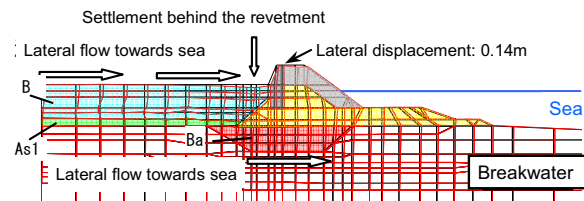


Fig. 8 Deformed mesh of breakwater (Black: Initial state $t = 0$ (s), Red: $t = 30$ (s))

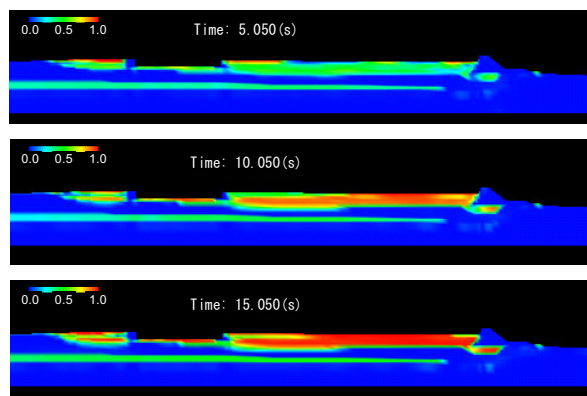


Fig. 9 Distribution of mean effective stress decreasing ratio

このように、内護岸Bと防潮堤の間では、液状化に伴う側方流動により、運河側へ水平移動する領域と海側へ水平移動する領域があり、護岸構造物が運河側および海側へ移動しようとする不釣り合い力と地層の傾斜による不釣り合い力の相互作用の結果としての現象であると考えられる。また、実際の測量結果と比較すると、水平移動量に大きな差異は見られず、モデル化した地盤の妥当性も検証されたとと言える。

6. おわりに

地盤情報データベースから地盤モデルを想定し、兵庫県南部地震時の液状化解析による護岸構造物の

側方流動シミュレーションを行った。その結果、傾斜した地層の上に存在する護岸構造物の側方流動のメカニズムについて検討すると共に、想定した地盤モデルの妥当性を検証した。

ここで妥当性が検証された地盤モデルに東南海・南海地震波を入力し、長周期で継続時間の長い地震時の液状化挙動と護岸構造物の側方流動について研究を進めていく予定である。また、本研究は微小ひずみ理論に基づいた解析であるため、今後は有限変形理論に基づいた解析法など、大変形を精度良く追跡可能な解析法により検討を行う必要がある。

謝 辞

本研究は神戸の地盤・減災研究会、液状化分科会の研究の一環として行われたものである。同研究会委員長の神戸大学 沖村孝先生、同研究会液状化分科会の神戸大学 田中泰雄先生、推定地盤断面を作成して頂いた応用地質株式会社の南部光広氏、入力地震波をご提供頂いた応用地質株式会社の長谷川信介氏、解析を援助して頂いた株式会社ダイヤコンサルタントの荒木繁幸氏、同分科会幹事の中央復建コンサルタント株式会社の八谷誠氏、有意義な議論を頂いた液状化分科会の全メンバーに感謝の意を表する。

参考文献

- 液状化解析手法 LIQCA 開発 グループ (2004) : LIQCA2D04 (2004 年 公開 版) 資 料 , <http://nakisuna2.kuciv.kyoto-u.ac.jp/liqca.htm>.
- 関西地盤情報活用協議会 (1998) : 新関西地盤, 神戸および阪神間.
- 神戸の地盤研究会 (1999) : 地盤情報データベース システム, 神戸 JIBANKUN.
- 神戸の地盤研究会 (2002) : 神戸の地盤研究会 研究成果報告 中間とりまとめ.
- 杉戸真太・合田尚義・増田民夫 (1994) : 周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/II-27, pp.49-58.
- 田中泰雄 (1998) : 臨海埋立地の盛土材料の液状化強度と影響因子, 土と基礎, Vol.47, No.6, pp.33-36
- 東拓生・田村敬一 (1997) : 地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化強度評価法, 土木技術資料, Vol.39, No.9, pp.50-55.
- 古本吉倫・杉戸真太・梅原秀哲 (1999) : 震動卓越方向を考慮した兵庫県南部地震の強震動シミュレーション, 土木学会第54回年次学術講演会概要

(CD-ROM).
Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S. (1999) : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680.

A Liquefaction Analysis for Lateral Flows of Slightly-inclined Coastal Ground

Fusao OKA* and Yosuke HIGO*

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

It is well known that lateral flows due to liquefaction are often observed in saturated sand layer existing in slightly inclined ground or ground behind revetments. One of the features of geological structure of Kobe is inclination from land to sea, and for the other there are many revetments and reclaimed land in coastal area. The present paper describes a liquefaction analysis for lateral flows of slightly-inclined coastal ground using a cyclic elasto-plastic constitutive model and dynamic finite element method. The input wave is the Hyogoken-Nambu earthquake. Comparing displacement of revetments obtained by numerical simulation and that by the observed data, validation of the analysis model and lateral flow behavior of revetments are discussed.

Keywords: liquefaction, lateral flow, slightly-inclined ground, revetments